УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

УДК 539.3

К.В. РОЩИН

УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ВЫВОДОВ РАДИОЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОЙ И СЛУЧАЙНОЙ ВИБРАЦИИ

Использование известных гипотез при расчете выводов радиоэлементов (РЭ) на усталость при воздействии случайной вибрации встречает большие сложности. Разработанные расчетные модели легли в основу автоматизированной подсистемы анализа и обеспечения времени до усталостного разрушения пластинчатых и стержневых элементов конструкций блоков кассетного типа и блоков этажерочного типа бортовой радиоэлектронной аппаратуры при вибрационных воздействиях и использованы для оценки времени до усталостного разрушения выводов РЭ.

Ключевые слова: *выводы радиоэлементов, усталостное разрушение, гармоническая, случайная вибрация, колебания, напряжения, накопление повреждений.*

Введение. Время до усталостного разрушения выводов радиоэлементов при гармонической вибрации определяется по формуле [1]:

$$t_p = \frac{N_p}{f}, \qquad (1)$$

где N_p – число циклов напряжений до разрушения; f – текущая частота колебаний.

Число циклов до усталостного разрушения при гармонической вибрации рассчитывается по формуле [3]:

$$N_p = N_B \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{\max}}\right)^m, \qquad (2)$$

где σ_0 – предел усталости материала вывода; m – параметр, зависящий от материала, размеров и формы вывода; N_B – базовое число циклов; $\sigma_{\max}$ – максимальное механическое напряжение в выводе РЭ.

Параметр m характеризует угол наклона кривой усталости. На рис.1 приведены полученные экспериментально кривые усталости материала, так называемые кривые Веллера [4–6]. Они выражают зависимость амплитуды напряжения в симметричном цикле от числа N_B циклов до разрушения. Кривая 1 характерна для сталей малой и средней прочности, а также для титановых сплавов при испытании без воздействия коррозии и при нормальной температуре, кривая 2 – для цветных металлов и высокопрочных легированных сталей. Кривая 1 имеет резкий перелом при числе циклов $N_p \approx 10^6$, после чего она идет практически параллельно оси абсцисс,

поэтому за базу испытаний для таких материалов принимают $N_B = 10^7$. Физически это означает, что если амплитуда σ переменного напряжения будет меньше напряжения σ_0, соответствующего точке перелома, то усталостное разрушение не наступает при неограниченном числе циклов. Это напряжение σ_0 и получило название предела усталости материала при симметричном цикле. Некоторые материалы, в частности цветные металлы, многокомпонентные сплавы, не имеют выраженного предела усталости: с увеличением числа циклов N_p прочность продолжает падать (см.рис.1, кривая 2). Для таких материалов сопротивление усталости характеризуют пределом ограниченной выносливости при заданной базе (числе циклов) N_B, которая обычно принимается равной $5\ 10^7$ циклам. Это в полной мере относится к выводам РЭ, так как они изготавливаются из цветных металлов и их сплавов.

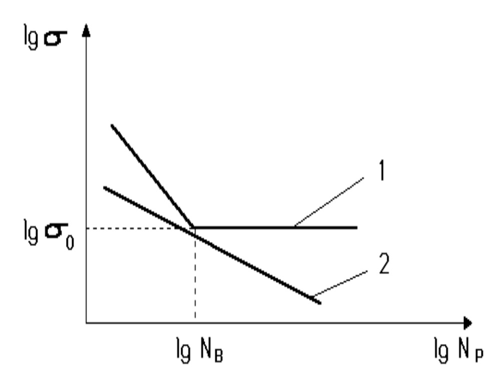


Рис.1. Кривые усталости для различных материалов

Значения параметра m для машиностроительных конструкций приведены в [4]. Для РЭ можно в некотором приближении воспользоваться этими данными, но для более точных расчетов потребовалось получить экспериментально кривые Веллера для различных конструкций РЭ. Для этих целей была разработана специальная методика и получены значения параметров m и σ_0 для различных видов конструкций РЭ.

Методика расчета. Для расчета выводов РЭ на усталость при воздействии случайной вибрации необходимо использовать одну из гипотез суммирования усталостных повреждений, возникающих от действия амплитуд различных уровней. Использование известных гипотез [7-11] встречает большие сложности при расчетах в условиях случайного нагружения, так как в этом случае становится неопределенным понятие цикла нагрузки и схематизация такого нагружения может привести к существенным погрешностям при расчете усталостной прочности выводов РЭ.

Для стационарного случайного процесса использована гипотеза суммирования усталостного повреждения при циклическом нагружении, основанная на суммировании энергии колебаний на отдельных частотах [12].

В соответствии с этой гипотезой время до усталостного разрушения выводов РЭ при случайном воздействии может быть найдено по формуле:

$$t = \frac{2\pi A}{\Delta^{m}\left(\sqrt{2}\right)^{m}\Gamma\left(\frac{m+2}{m}\right)\left(\int_{\omega} S_{0}(\omega)\,\omega^{2/m}d\omega\right)^{m/2}}, \qquad (3)$$

где $\Delta = \sqrt{D}$ – среднеквадратическое отклонение текущих значений напряжений; D – дисперсия; $S_0(\omega) = \frac{S(\omega)}{D}$ – приведенная спектральная плотность; $S(\omega)$ – спектральная плотность; $\Gamma\left(\frac{m+2}{m}\right)$ – гамма-функция; ω – круговая частота гармонического нагружения $(\omega = 2\pi f)$; A, m – характеристики кривой усталости в соответствии с уравнением $N_p\sigma_a^m = A$; $\sigma_0 = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$ – амплитуда напряжения в цикле; $\sigma_{\min}$ – минимальное механическое напряжение в выводе РЭ (с учетом знака).

Для расчета по формулам (1)–(3) времени до усталостного разрушения выводов РЭ необходимо определить механические напряжения в выводах. Следовательно, нужно получить макромодели РЭ для расчета механических напряжений в выводах, а затем, используя их совместно с моделями (1)–(3), рассчитать время до усталостного разрушения выводов РЭ при гармонической и случайной вибрациях.

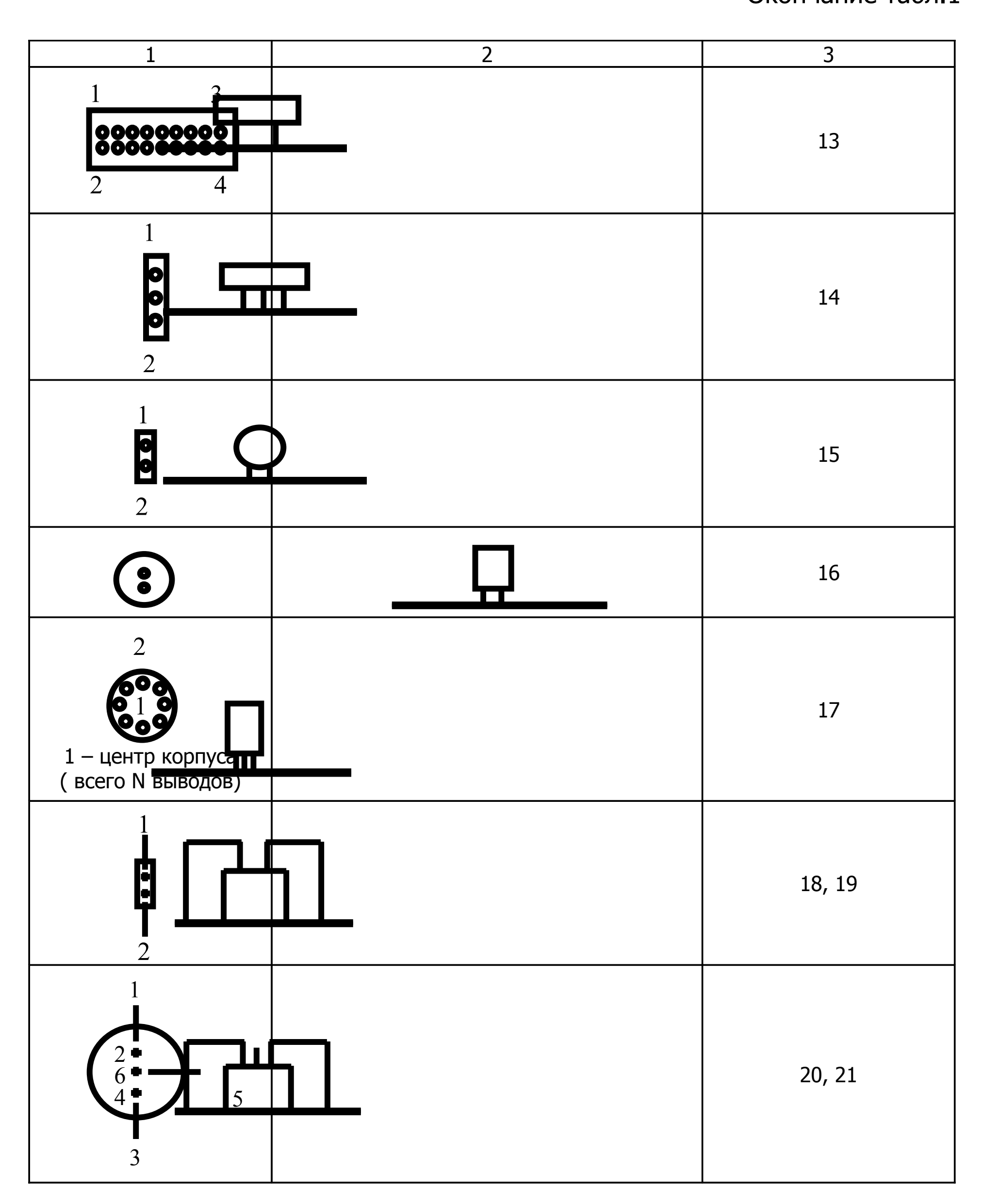
Один и тот же РЭ может быть закреплен различными способами (табл.1). Например, резистор может иметь шифры способов крепления 1, 3, 4. Это приводит к тому, что один и тот же РЭ имеет различные расчетные макромодели. В то же время разные РЭ могут иметь незначительные конструктивные отличия корпусов, крепления, а следовательно, одинаковые расчетные макромодели. Например, диод с шифром способа крепления 18 и транзистор с шифром способа крепления 20 имеют одну и ту же расчетную макромодель вывода. Радиоэлементы, установленные на собственных выводах, могут иметь резонансы в диапазоне частот воздействующей вибрации или акустического шума, которые приводят к значительному возрастанию колебаний и, в результате, чаще всего к поломкам выводов. Радиоэлементы, корпуса которых жестко скреплены с платой, практически не имеют резонансов в рабочем диапазоне частот механических воздействий, но из-за изгибных колебаний ПУ имеют значительные механические напряжения в выводах, которые также могут привести к поломкам, в том числе к усталостным. Выводы таких РЭ имеют значения собственных частот, значительно превышающие верхнюю границу заданного частотного диапазона. Поэтому резонансные колебания выводов РЭ, корпуса которых жестко скреплены с платой, здесь не рассматриваются.

Таблица 1

Варианты установки РЭ на плате

Способ крепления		Варианты установки РЭ
Вид сверху	Вид слева	
1	2	3
1 2		1
1 3 2 4		2
1 2		3, 4
1 3 2 4		5, 6
1 2		7, 8
1 2		9, 10
1 2		11
1 2		12

Окончание табл.1



1	2	3
1 3 2 4		13
1 2		14
1 2		15
		16
2 1 1 – центр корпуса (всего N выводов)		17
1 2		18, 19
1 2 6 4 3 5		20, 21

Примечание: 1. Символом "о" обозначены невидимые сверху точки крепления выводов РЭ к плате.

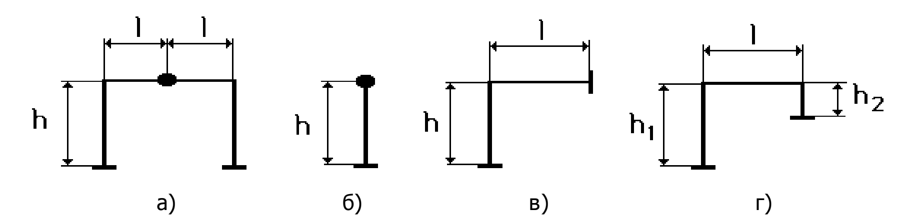
2. Цифрами обозначены точки крепления выводов РЭ к плате, для которых нужно вводить координаты.

3. Если указаны два варианта установки, то при этом первый вариант установки означает приклеивание, а второй – жесткое закрепление (винтовое, хомутиком и т.д.).

Количество РЭ на печатной плате может превышать сотню. В одном блоке может быть несколько десятков ПУ. В одной стойке или шкафе может быть несколько блоков. Несложный арифметический расчет показывает, что в одной стойке или шкафе может быть несколько тысяч РЭ. Если проводить расчет в частотном диапазоне, например на 100 частотах, по-

требуется проводить несколько сот тысяч расчетов РЭ для одной стойки или шкафа, а если расчет проводить по методу Монте-Карло, то и того больше. И если при этом использовать дискретные модели, то расчет может затянуться на месяцы и даже годы. Единственным выходом является использование аналитических макромоделей РЭ. Кроме того, количество расчетов можно уменьшить методически, используя аналогию конструкций и опыт расчетов для предыдущих проектов.

Рассмотрим способы крепления РЭ, представленные в табл. 1 под шифрами 1 и 2. В этом случае масса корпуса РЭ много больше массы выводов. Следовательно, массой выводов можно пренебречь. В то же время жесткость выводов на изгиб много меньше жесткости корпуса РЭ на изгиб. Таким образом, расчетная макромодель представляется в виде П-образной рамы с защемленными краями и сосредоточенной посередине массой (рис. 2,а). Аналогично для способов крепления РЭ, представленных в табл. 1 под шифрами 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, расчетные макромодели имеют вид сосредоточенных масс, установленных на стержне (рис. 2,б). В зависимости от направления динамической силы такие макромодели при определении собственных частот колебаний РЭ нужно рассматривать как системы с одной, двумя или, например, шестью степенями свободы. Для таких систем при расчете ускорений корпусов РЭ и собственных частот колебаний РЭ используется макромодель конструкции РЭА на виброизоляторах, которая приведена в [1]. Для расчета напряжений в выводах используется метод сил [2], широко применяемый в строительной механике.



а) б) в) г)

Рис.2. Расчетные модели радиоэлементов

Учитывая, что у РЭ с шифрами способов крепления 3–10, 18–21 корпуса жестко скреплены с платой и не влияют на колебания выводов при механических воздействиях, макромодели для расчета напряжений в выводах в таких РЭ можно представить в виде рам. Расчетные макромодели, представленные на рис.2,в,г соответствуют способам крепления РЭ с шифрами 3–10, 18–21.

Так как колебания выводов РЭ являются изгибными, для расчета времени до усталостного разрушения выводов РЭ необходимы только нормальные механические напряжения, которые можно определить по формуле [2]:

$$\sigma = \frac{Md}{2I} , \qquad (4)$$

где M – изгибающий момент в сечении вывода, в котором рассчитывается напряжение; d – сторона поперечного сечения вывода, параллель-

ная плоскости изгиба (для круглого сечения – диаметр); I – момент инерции поперечного сечения вывода.

Очевидно, что механические напряжения следует определять в так называемых опасных сечениях выводов, в которых они максимальны и вероятность поломки наибольшая. Это места крепления выводов к корпусу РЭ и к плате, а также точки изгиба. Как видно из формулы (4), основным неизвестным является изгибающий момент. Необходимо провести его расчет для различных способов крепления РЭ.

Для определения виброускорения РЭ, установленного на собственных выводах, получена следующая общая формула:

$$\left|a_p\right| = a\sqrt{\frac{I+\gamma^2}{\left(I-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2+\gamma^2}}, \qquad (5)$$

где a – ускорение участка ПУ в месте крепления выводов РЭ; ω_0 – резонансная частота колебаний РЭ (циклическая); ω – текущая круговая частота колебаний; γ – КМП в материале вывода.

Данная модель является нелинейной, так как γ зависит от напряжения, которое в свою очередь зависит от виброускорения. Учет рассеивания энергии в материалах конструкции проводится согласно гипотезе Сорокина.

Получены формулы расчета резонансных частот для поступательных и вращательных движений корпуса РЭ и изгибающих моментов при вибрационных воздействиях. Фрагменты их приведены в табл.2 и 3.

Таблица 2

Математические модели выводов радиоэлементов, корпуса которых скреплены с платой

Номер	Схема и нагрузка	Математические модели
1	l, B, C, h, θ, A, f	$M_A = \frac{EI}{(1+k)h}\left(\frac{3f}{l}+(3+4k)\theta\right)$, $M_B = \frac{2EI}{(1+k)l}\left(\frac{3f}{h}+\theta\right)$, $M_C = \frac{EI}{1+k}\left(\frac{3(1+2k)f}{h^2}+\frac{\theta}{l}\right)$, $k=\frac{h}{l}$

Таблица 3

Математические модели радиоэлементов на собственных выводах

Номер	Схема и нагрузка	Математические модели
1	a_z, P_z, B, C, E, h, A, θ_x, D, L = P_z, 2, 3, 1, 4 + 2′, 5′, 3′, 1′, θ_x, 4′	$M_1 = M_4 = \dfrac{P_z L}{8(2+k)}$; $M_A = M_D = M_1 + M_1'$; $M_B = M_C = M_2 + M_2'$; $M_2 = M_3 = \dfrac{P_z L}{4(2+k)}$; $M_E = M_5 - M_5'$; $M_5 = \dfrac{P_z L}{4(2+k)}(1+k)$; $M_1' = M_4' = \dfrac{2\theta_x(3+2k)EI}{h(2+k)}$; $k = \dfrac{h}{L}$, $P_z = \dfrac{m\lvert a_z\rvert}{N_p}$; $M_2' = M_3' = \dfrac{4EI\theta_x}{L} - kM_1'$; $M_5' = \dfrac{4EI\theta_x}{L} + kM_1'$; $\omega_0 = \sqrt{\dfrac{24EI}{mh^3\left(1+\dfrac{3}{6k+1}\right)}}$.
4	a_y, B, E, C, P_y, h, A, D, l	$M_A = M_D = \dfrac{P_y h}{2}$, $M_B = M_C = \dfrac{P_y L^2}{16Eh/G + 8L}$; $M_E = \dfrac{P_y L}{4}\left(1 - \dfrac{L}{4Eh/G + 2L}\right)$; $\omega_0 = \sqrt{\dfrac{2N_p}{\dfrac{m}{EI}\left(\dfrac{L^3}{24} + \dfrac{h^3}{3} - \dfrac{L^4 G}{32(2hE + LG)}\right)}}$; $P_y = \dfrac{m\lvert a_y\rvert}{N_p}$.
5	a_z, P_x, h, A, θ_x	$M_A = \dfrac{P_x h'}{N_v}$; $\omega_0 = \sqrt{\dfrac{C_x N_v}{Q}}$; $h' = h - \dfrac{D}{2}$; $C_x = \dfrac{EI}{5d}$; $P_x = \dfrac{m\lvert a_x\rvert}{N_v}$; $a_x = h' tg\theta_x \omega^2$. 1. Шифры 11, 12, 13: $Q = \dfrac{mD^2}{16} + m\left(\dfrac{L_R^2}{12} + h^2\right)$ – для корпуса круглого сечения, $Q = \dfrac{m}{12}\left(D^2 + L_R^2\right) + mh^2$ – для корпуса прямоугольного сечения. 2. Шифр 14: $Q = \dfrac{m}{12}\left(D^2 + L_R^2\right) + mh^2$. 3. Шифр 15: $Q = \dfrac{mD^2}{8} + mh^2$ и др.

Выводы. Разработанные расчетные модели легли в основу автоматизированной подсистемы анализа и обеспечения времени до усталостного разрушения пластинчатых и стержневых элементов конструкций блоков кассетного типа и блоков этажерочного типа бортовой радиоэлектронной аппаратуры при вибрационных воздействиях и были использованы для оценки времени до усталостного разрушения выводов РЭ.

Библиографический список

1. *Токарев М.Ф.* Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры / М.Ф.Токарев, Е.Н.Талицкий, В.А.Фролов. – М., 1983. – 256 с.
2. *Степин П.А.* Сопротивление материалов: учебник для немашиностроит. спец. вузов / П.А.Степин. – М.: Высшая школа, 1988. – 367 с.
3. *Иосилевич Г.Б.* Прикладная механика: для студентов втузов / Г.Б. Иосилевич, П.А.Лебедев, В.С.Стреляев. – М.: Машиностроение, 1985. – 576 с.
4. *Трощенко В.Т.* Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник / В.Т.Трощенко, Л.А.Сосновский. – Киев: Наукова думка, 1987. – 1303 с.
5. *Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М.* Несущая способность и расчет деталей машин на прочность: руководство и справочное пособие / под ред. С.В. Серенсена. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
6. Прочность при нестационарных режимах нагружения / Серенсен С.В., Буглов Е.Г., Гарф М.Э. и др. – Киев: Изд-во АН УССР, 1961. – 295 с.
7. Кожевников А.М. Исследование и разработка машинных методов расчета конструкций печатных узлов РЭА при внешних механических воздействиях: дис…. канд. техн. наук. – М., 1976. – 186 с.
8. *Филатов Э.А.* Изучение накопления усталостного повреждения в зависимости от режима эксплуатационного нагружения / Э.А.Филатов, В.Э.Павловский, Ю.А.Панфилов // Проблемы прочности, 1971. – № 3. – С. 10-14.
9. *Болотин В.В.* Статистические методы в строительной механике / В.В.Болотин. – М.: Стройиздат, 1965. – 279 с.
10. *Решетов Д.Н.* Расчет деталей станков / Д.Н.Решетов. – М.: Машгиз, 1945. – 138 с.
11. Павлов П.А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность / П.А.Павлов. – Л.: Машиностроение, 1988. – 252 с.
12. Райхер В.Л. Гипотеза спектрального суммирования и ее применение к определению усталостной долговечности при дей-

ствии случайных нагрузок / В.Л. Райхер // Проблемы надежности в строительной механике. – Вильнюс, 1968. – С. 267-273.

Материал поступил в редакцию 29.02.08.
K.V. ROSCHIN

THE FATIGUE FAILURE OF RADIOELEMENTS OUTPUTS AT HARMONIC AND CASUAL VIBRATION

Using of known hypotheses at calculation radioelements outputs (RE) on a fatigue at action of casual vibration meets major complexities at calculations in requirements of a casual loading. Designed calculated models are put in foundation of the automized subsystem for the analysis and security of time before fatigue failure of plate-like and rod devices of constructions of cassette and floor type blocks of onboard radio-electronic equipment at vibrational actions and are used for an time estimation before fatigue failure of RE outputs.

РОЩИН Константин Владимирович (р.1983), соискатель кафедры «Информатика» ДГТУ. Окончил Кубанский государственный технологический университет (2005).
Область научных интересов связана с решением проблем прочности и надежности элементов конструкций бортовой радиоэлектронной аппаратуры при механических воздействиях.
Автор 5 научных публикаций.